

다중 사용자 다중 안테나 시스템을 위한 혼합 피드백 기반 무선 전력 전송 기법

김 선 영*, 최 지 훈°

Distributed Wireless Power Transfer for Multiuser Multi-Antenna Systems Using Hybrid Feedback

Seonyeong Kim*, Jihoon Choi°

요 약

본 논문에서는 다중 사용자 환경에서 다중 안테나를 사용하는 공유기를 사용한 전력 전송을 위해 1-비트 피드백과 전력 크기 피드백을 혼용한 새로운 피드백 방식을 제안하고, 이에 기반한 공유기 에너지 빔포밍 벡터 업데이트 기법을 제안한다. 하향링크에서 전력을 충전하고 상향링크에서 충전된 전력을 이용하여 정보를 전송하는 경우, 하향링크에서 수신 신호 전력은 추정 가능하지만 채널 상태 정보의 추정은 힘들다. 따라서 하향링크와 상향링크 채널이 비대칭인 경우 채널 상태 정보에 기반한 에너지 빔포밍은 구현이 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 제안된 기법에서는 전력 크기 피드백을 이용하여 에너지 빔포밍을 위한 사용자 우선 순위를 정한다. 또한, 1-비트 피드백을 사용하여 우선 순위가 높은 사용자의 수신 전력이 증가하도록 가변 스텝 크기 기반 빔포밍 벡터 업데이트를 수행한다. 모의실험을 통해 제안된 에너지 빔포밍 기법과 랜덤 빔포밍 방식 및 이론적 최적 빔포밍 기법의 평균 전력 전송 성능을 비교하고, 제안된 기법의 유효성을 보인다.

Key Words : Wireless power transfer, MIMO, multiuser, feedback, random perturbation, beamforming

ABSTRACT

In this paper, we propose a new hybrid feedback method composed of one-bit feedback and power-level feedback to remotely charge multiple users using a multi-antenna access point (AP), and also propose an energy beamformer update method for the AP based on the proposed feedback scheme. When wireless charging is conducted in the downlink and information transfer is performed in the uplink, it is possible to estimate the power level of receive signals but difficult to estimate the channel state information (CSI) in the downlink. For this reason, it is hard to implement energy beamforming based on the CSI when the uplink and downlink channels are asymmetric. To solve this problem, the proposed method determines the user priority for energy beamforming using the power-level feedback information. Moreover, the beamforming vector is updated with a variable step-size using the one-bit feedback information in order to increase the receive power of the high-priority user. Through numerical simulations, the proposed energy beamforming method is compared to a random beamforming and the theoretical optimal beamforming in terms of the average power transfer, and the efficacy of the proposed scheme is verified.

* 본 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019R1A2C1006418)

• First Author : Korea Aerospace University, School of Electronics and Information Engineering, kimsy6311@kau.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Korea Aerospace University, School of Electronics and Information Engineering, jihoon@kau.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2020-061-A-RN, Received March 20, 2020; Revised May 22, 2020; Accepted June 20, 2020

1. 서 론

최근 무선 충전 기술이 각광받고 있고, 자기 유도 방식, 자기 공진 방식, 그리고 전자기파 방식이 사용된다. 그 중 전자기파 방식은 RF(Radio Frequency) 신호를 DC(Direct Current)로 변환시켜 전원을 공급하는 방식이다. 전자기파 방식은 자기 유도 방식과 자기 공진 방식에 비해 충전 거리가 길어서 이동 단말에 적합하고, 이동성과 휴대성을 높일 수 있다^{1,2)}.

전자기파 무선 충전 방식에서는 공유기의 전력 전송 효율을 높이기 위해 다중 안테나를 이용한 에너지 빔포밍 기법이 널리 활용된다. 통상적으로 하향링크에서 전력을 충전하고 상향링크에서 충전된 전력을 이용하여 정보를 전송하는 방식이 이용된다³⁻⁵⁾. 이때 무선 충전 효율을 극대화하거나 정보 전송과 전력 전송을 동시에 고려한 혼련 신호 구조 및 전송 신호 파형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁶⁻⁹⁾. 주파수 분할 다중화를 사용하거나 송수신기에 비대칭 간섭이 작용하는 경우 하향링크 채널과 상향링크 채널이 비대칭이 된다. 이 경우 하향링크에서는 수신 신호 전력만을 알 수 있고, 하향링크 채널 상태 정보(CSI; channel state information)를 직접 추정하기 힘들다. 이 문제를 해결하기 위해 상향링크 채널로 수신 전력 정보를 피드백하고 이를 이용해서 에너지 빔포밍 벡터를 결정하는 기법이 제안되었다¹⁰⁻¹³⁾. [10]에서는 DS-CDMA(direct sequence code division multiple access) 시스템에서 랜덤 교란(perturbation)과 수신 전력 기반 1-비트 피드백을 이용하여 빔포밍 벡터를 순차적으로 업데이트하는 방법을 제안했고, [11]에서는 다수의 분산 노드에서 전력을 송신할 때 1-비트 피드백을 이용한 분산 빔포밍 기법을 제안하였다. 이 방식의 경우 무선 전력 전송에 적용 가능하지만 다중 사용자 환경에 적용할 수 없다. [12]에서는 수신 전력 기반 1-비트 피드백 정보를 기반으로 ACCPM(analytic center cutting-plane method)을 적용하여 다중 사용자의 채널을 순차적으로 업데이트하여 추정하고 이에 대응되는 최적 빔포밍 벡터를 계산하는 방법을 제안하였다. 이 방식은 [10]에서 제안된 방식에 비해 수렴이 빠르지만 채널 추정을 위한 계산 복잡도가 매우 높다. [13]에서는 수신 전력 크기를 피드백 받아서 최소자승 (least squares) 또는 Kalman 필터를 이용하여 다중 안테나 채널을 직접 추정하는 기법을 유도하였다. 이 방식은 다중 사용자 환경으로 확장 가능하지만, 수신 전력 측정을 위한 혼련 심볼 전송 구간이 필요하고 정확한 채널 추정을 위해 다수의 수신 전력 크기에

대한 정보가 요구되므로 피드백 부하가 큰 단점이 있다.

본 논문에서는 다중 사용자 환경에서 다중 안테나 공유기의 전력 전송 효율을 극대화하기 위해 새로운 에너지 빔포밍 기법을 제안한다. 제안된 기법은 1-비트 피드백과 전력 크기 피드백을 혼합하여 CSI를 모르는 경우에도 채널을 직접 추정하지 않고 수신 전력이 낮은 단말의 수신 전력이 증가하는 방향으로 빔포밍 벡터를 조정한다. 매 심볼 주기마다 1-비트 피드백을 받고, 이보다 크게 미리 정한 주기마다 전력 크기 피드백을 받으며, 수신 전력 피드백을 이용하여 수신 전력이 가장 낮은 단말을 찾고, 1-비트 피드백을 이용하여 최소 전력 단말을 기준으로 빔포밍 벡터를 순차적으로 업데이트 한다. 이때 업데이트 속도를 개선하고 수렴 후 전력 전송 효율을 높이기 위해 가변 스텝 크기를 적용한 업데이트 모델을 제안하고, 이에 적용되는 파라미터를 설계한다.

본 논문의 2장에서는 제안된 기법의 시스템 모델을 설명하고 문제를 정의한다. 3장에서는 피드백 기반 무선 전력 전송 기법을 제안하며 4장에서는 모의실험을 통해 빔포밍 벡터 생성을 위한 가변 스텝 크기를 설정하고, 제안된 에너지 빔포밍 기법의 수렴 특성을 확인한다. 또한 에너지 빔포밍 기법과 랜덤 빔포밍 및 이론적 최적 빔포밍 기법의 평균 최소 수신 전력을 비교한다. 마지막으로 5장에서는 제안된 전송 기법과 성능 분석 결과를 정리하며 끝을 맺는다.

II. 시스템 모델 및 문제 정의

그림 1은 제안된 무선 전력 전송 기법의 시스템 모델을 나타낸다. L 개의 전력 공유기와 K 개의 단말을 사용하고, 공유기 안테나 수는 M 개, 단말 안테나 수

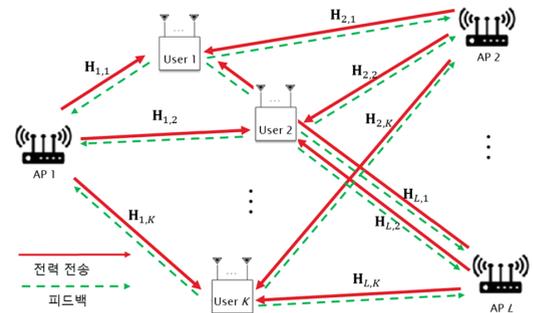


그림 1. 무선 전력 전송을 위한 시스템 모델
Fig. 1. System model for wireless power transfer

는 N 개이다. 공유기에서 단말로 전력을 전송하고, 단말에서는 공유기로 피드백을 전송한다. l 번째 공유기에서 k 번째 단말로 전송하는 수신 신호는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_{l,k} = \mathbf{H}_{l,k} \mathbf{v}_l s_l + \mathbf{z}_{l,k} \quad (1)$$

이때 $\mathbf{y}_{l,k}$ 는 수신 신호 벡터, $\mathbf{H}_{l,k}$ 과 $\mathbf{v}_{l,k}$ 는 각각 채널 행렬과 에너지 빔포밍 벡터이고, s_l 은 $E[|s_l|^2] = 1$ 을 만족하는 임의의 심볼, $\mathbf{z}_{l,k}$ 는 잡음 벡터이다. k 번째 단말의 총 수신 전력은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_k(\mathbf{v}) = \eta \sum_{l=1}^L \mathbf{v}_l^H \mathbf{H}_{l,k}^H \mathbf{H}_{l,k} \mathbf{v}_l \quad (2)$$

이때 $\mathbf{v} = \{\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T, \dots, \mathbf{v}_L^T\}$ 이고, η 는 수신 전력 충전 효율이다. 최소 전력을 수신하는 단말의 전력을 최대로 하는 문제를 다음과 같이 정의한다.

$$\max_{\mathbf{v}} \min \{J_1(\mathbf{v}), J_2(\mathbf{v}), \dots, J_K(\mathbf{v})\} \quad (3a)$$

$$s.t. \mathbf{v}_l^H \mathbf{v}_l \leq 1 \text{ for } \forall l; P_T \leq 1 \quad (3b)$$

이때 P_T 는 총 송신 전력이다. (3)은 convex 최적화 문제이므로 공유기에서 모든 단말에 대한 CSI를 아는 경우 interior-point 기법 등을 이용하여 최적 빔포밍 벡터를 구할 수 있다^[4]. 하지만, 주파수 분할 다중화를 사용하여 하향링크에서 전력 전송에 사용하는 주파수 대역과 상향링크에서 정보를 전송하는 주파수 대역이 다른 경우, 혹은 시분할 다중화를 사용하는 경우에도 공유기와 단말에 비대칭적 간섭이 유발되는 경우 하향링크와 상향링크의 채널이 달라진다. 이 경우 단말에서 하향링크 채널을 추정하여 상향링크 피드백 채널을 통해 공유기로 전달해야 하지만 통상적인 전력 수신기의 경우 신호 크기만을 알 수 있으므로 단말에서 하향링크 CSI를 추정하기가 힘들다.

III. 제한된 피드백 기반 무선 전력 전송

하향링크 채널을 이용하여 전력을 전송하는 경우 단말에서는 수신 신호의 크기만을 알 수 있으므로 채

널 상태 정보 추정이 힘들다. 본 논문에서는 직접적인 채널 추정 없이 에너지 빔포밍을 수행하기 위해 랜덤 교란과 1-비트 피드백을 이용하여 빔포밍 벡터를 업데이트하는 기법을 제안한다. 특히 최대-최소 관점에서 수신 전력이 가장 낮은 단말의 빔포밍이 중요하므로 미리 정해진 주기에 따라 수신 전력 정보를 피드백하여 수신 전력이 가장 낮은 단말 정보를 갱신한다. 또한, 과도 구간(transient period)에서의 수렴 속도를 높이고 정상 상태에서의 추적 오차를 줄이기 위해 가변 스텝 크기를 사용한다. 이 절에서는 제안된 빔포밍 기법을 단계별로 설명한다.

3.1 에너지 빔포밍 벡터 생성

1번째 공유기에서는 랜덤 교란을 사용해 다음과 같이 2가지 빔포밍 벡터를 생성한다.

$$\mathbf{w}_l^+(n+1) = [\mathbf{w}_l(n) + \beta(i)\mathbf{p}] \quad (4a)$$

$$\mathbf{w}_l^-(n+1) = [\mathbf{w}_l(n) - \beta(i)\mathbf{p}] \quad (4b)$$

이때 $\mathbf{w}_l(n)$ 은 n 번째 업데이트에서 빔포밍 벡터이고, \mathbf{p} 는 가우시안 랜덤 교란 벡터이다. $\beta(i)$ 는 i 번째 업데이트된 가변 스텝 크기이고, 이 때 i 는 1보다 크고 T_f 보다 작은 자연수이다. (3)의 $\mathbf{v}_l^H \mathbf{v}_l \leq 1$ 을 만족시키기 위해 생성한 빔포밍 벡터를 다음과 같이 정규화한다.

$$\mathbf{v}_l^+(n+1) = \frac{\mathbf{w}_l^+(n+1)}{\|\mathbf{w}_l^+(n+1)\|} \quad (5a)$$

$$\mathbf{v}_l^-(n+1) = \frac{\mathbf{w}_l^-(n+1)}{\|\mathbf{w}_l^-(n+1)\|} \quad (5b)$$

그림 2에서는 공유기에서 사용하는 하향링크 에너지 빔포밍 벡터의 시간적인 변화 과정을 나타낸다. T_s 구간을 기준으로 처음 $T_s/2$ 구간에서는 $\mathbf{v}_l^+(n)$, 다음 $T_s/2$ 구간에서는 $\mathbf{v}_l^-(n)$ 을 사용하여 에너지

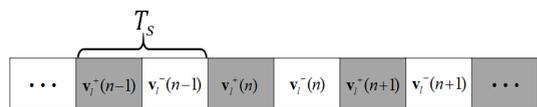


그림 2. 하향링크 빔포밍 벡터의 시간적 업데이트
Fig. 2. Time update of downlink beamforming vectors

빔포밍을 수행한다. 또한, (4)와 (5)에서 설명한 과정을 통해 새로운 빔포밍 벡터가 생성되면, 다음 T_s 구간에 동일한 방법으로 적용된다.

3.2 전력 크기 피드백 주기를 이용한 가변 스텝 크기

빔포밍 벡터를 업데이트할 때 스텝 크기(step-size)가 큰 경우엔 수렴이 안되거나 수렴 후 성능이 저하되고, 스텝 크기가 작은 경우엔 수렴 속도가 느린 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 (4)에서 랜덤 교란을 이용하여 새로운 빔포밍 벡터를 생성할 때 가변 스텝 크기를 사용한다. 제안된 기법에서는 업데이트 초기에 수렴 속도를 높이기 위해 스텝 크기를 크게 설정하고, 업데이트가 진행됨에 따라 스텝 크기를 단계적으로 줄여서 수렴 후에 최적값 대비 초과 평균자승오차(excess mean square error)에 의한 수신 전력 손실을 줄여준다. 제안된 가변 스텝 크기 $\beta(i)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta(i) = \frac{a}{1 + (0.01)i^b}, \quad a > 0, b > 0 \quad (6)$$

이때 a 는 $i=0$ 일 때 초기 스텝 크기를 나타내고, b 는 업데이트가 진행되면서 i 가 증가할 때 스텝 크기가 줄어드는 속도를 조절한다. a 와 b 는 수렴 속도와 수렴 후 평균 수신 전력을 고려해서 격자 검색(grid search)을 통해 설정한다. 상수 a 와 b 를 설정하는 과정은 4.1 절의 모의실험에서 상세히 설명한다.

3.3 제안된 에너지 빔포밍 기법 피드백 방식

제안된 에너지 빔포밍 기법에서는 송신기가 송신 채널을 알 수 없을 때 피드백을 이용해 빔포밍 벡터를 업데이트 한다. 그림 3에서는 k 번째 단말의 제안된 두 종류 피드백을 나타낸다. 미리 설정한 전송 주기 T_s

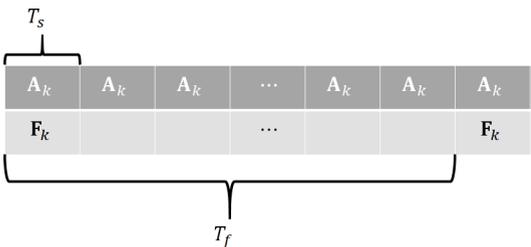


그림 3. k 번째 단말에서 제안된 혼합 피드백 전송 형태
Fig. 3. Proposed Transmit format of the proposed hybrid feedback at user k

에 따라 1-비트 피드백 A_k 를 전송하고, 미리 설정한 주기 T_f 에 따라 전력 크기 피드백 F_k 를 전송하며, $T_f = N_A T_s$ (N_A 는 1 보다 큰 정수)를 만족하는 것으로 가정한다. 이때 피드백 주기 T_s 와 N_A 는 상호 링크 데이터 프레임 전송 구조와 피드백 정보에 의한 부하를 고려하여 설정한다. 공유기에서 (5)의 방법으로 생성한 2가지 빔포밍 벡터를 그림 2와 같이 전송하는 경우 k 번째 단말의 수신 전력은 다음과 같다.

$$J_k^+(n+1) = \eta \sum_{l=1}^L \mathbf{v}_l^+(n+1)^H \mathbf{H}_{l,k}^H \mathbf{H}_{l,k} \mathbf{v}_l^+(n+1) \quad (7a)$$

$$J_k^-(n+1) = \eta \sum_{l=1}^L \mathbf{v}_l^-(n+1)^H \mathbf{H}_{l,k}^H \mathbf{H}_{l,k} \mathbf{v}_l^-(n+1) \quad (7b)$$

단말에서는 $\mathbf{v}_l^+(n+1)$ 을 사용해서 전송한 구간에서 $J_k^+(n+1)$, $\mathbf{v}_l^-(n+1)$ 을 사용해서 전송한 구간에서 $J_k^-(n+1)$ 을 측정한다.

$J_k^+(n+1) \geq J_k^-(n+1)$ 인 경우 $A_k = '+1'$ 로 설정하고, 아니면 $A_k = '-1'$ 로 설정한다. 그리고 그림 3과 같이 1-비트 피드백 채널을 통해 심볼 주기 T_s 마다 A_k 를 공유기로 전송한다.

전력 크기 피드백 F_k 는 T_f 구간 동안 수신된 신호의 평균 전력을 측정해서 설정하고, 다음과 같이 표현된다.

$$F_k = \sum_{n=1}^{N_A} \frac{J_k^+(cN_A + n) + J_k^-(cN_A + n)}{2} \quad (8)$$

이때 N_A 는 전력 크기 피드백 주기를 나타내고, $c = 0, 1, 2, \dots$ 는 이전의 전력 크기 피드백 전송 횟수를 의미한다. 즉, F_k 는 가장 최근에 수신한 T_f 구간 동안 평균 수신 전력을 이용해서 설정한다.

3.4 피드백을 이용한 에너지 빔포밍 벡터 업데이트

공유기에서는 K 개의 단말에서 수신한 전력 크기 피드백을 이용해서 수신 전력이 가장 낮은 단말을 다음과 같이 선택한다.

$$m = \arg \min_{1 \leq k \leq K} \{F_k\} \quad (9)$$

이때 선택한 m 은 다음 전력 크기 피드백이 수신될 때까지 유지된다. 공유기에서는 K 개의 단말에서 수신한 1-비트 피드백 정보 중에서 m 번째 단말에서 수신한 1-비트 피드백 A_m 을 이용해서 다음과 같이 공유기의 빔포밍 벡터를 업데이트한다.

$$\mathbf{v}(n+1) = \begin{cases} \mathbf{v}^+(n+1), & \text{if } A_m = '+1' \\ \mathbf{v}^-(n+1), & \text{if } A_m = '-1' \end{cases} \quad (10)$$

알고리즘 1. 제안된 에너지 빔포밍 벡터 업데이트 과정
Algorithm 1. Update procedure for the energy beamforming vector in the proposed method

제안된 에너지 빔포밍 벡터 업데이트 알고리즘

1. 초기화 : $n = 0$, 빔포밍 벡터 초기값 $\mathbf{v}(0)$ 를 임의로 설정 ($\|\mathbf{v}(0)\| = 1$ 만족)
2. 랜덤 교란을 이용하여 2가지 후보 빔포밍 벡터 생성: (4)-(5)
3. 단말에서 공유기로 피드백 정보 전송
 $n = cN_A$ 이면,
 $i = 0$, 단말에서 A_k 와 F_k 를 공유기로 전송
 $n \neq cN_A$ 이면,
단말에서 A_k 를 공유기로 전송
4. 공유기에서 F_k 를 이용해서 수신 전력이 가장 낮은 단말 선택: (9)
5. A_m 을 이용해서 빔포밍 벡터 업데이트: (10)
6. $n = n + 1, i = i + 1$, 단계 2로 이동

위와 같이 결정된 $\mathbf{v}(n+1)$ 은 다음 T_s 구간에서 (4)로 정의된 랜덤 교란을 이용하여 새로운 빔포밍 벡터를 생성할 때 사용된다.

제안된 피드백 기반 무선 전력 전송을 위한 에너지 빔포밍 벡터 업데이트 과정은 알고리즘 1로 요약할 수 있다.

IV. 모의실험

4.1 모의실험 환경

모의실험을 통해 제안된 기법의 가변 스텝 크기 모델에 사용되는 파라미터를 설정하고, 제안된 기법과 랜덤 빔포밍 기법, 그리고 이론적 최적 빔포밍 기법의

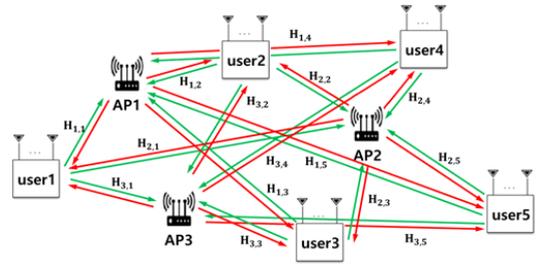


그림 4. 모의실험을 위한 공유기 및 단말 배치
Fig. 4. Deployment of APs and users for numerical simulations

전력 전송 성능을 비교한다. 이때 랜덤 빔포밍 기법에서는 공유기에서 초기에 임의로 설정한 빔포밍 벡터를 계속 사용하고, 최적 빔포밍 기법에서는 공유기에서 모든 단말에 대한 하향링크 CSI를 안다고 가정하고 (3)에서 정의한 최적화 문제의 해를 interior-point 기법으로 찾아서 에너지 빔포밍을 수행한다. 단말의 최소 충전 전력 보장이 중요하므로 전체 단말 중 수신 전력이 가장 낮은 단말의 수신 전력을 전력 전송 성능 지표로 정의한다.

그림 3은 모의실험을 위한 공유기 및 단말 배치를 나타낸다. 3개의 공유기와 5대의 단말을 고정해서 배치하고, 송수신 안테나 수는 공유기와 단말 모두 4개로 설정한다. 채널은 K-factor가 0 dB인 Rician 채널을 사용하고, 채널 $\{\mathbf{H}_{l,k}\}$ 는 서로 상관관계가 없다고 가정한다. 공유기의 송신 전력은 1W, 전력 충전 효율 η 는 1, 경로 손실 모델은

$20\log_{10}(f_c) + 10\alpha\log_{10}(d) - 28 + \chi$ 로 정의한다 [15]. 이때 $f_c = 2400\text{MHz}$, α 는 3이고, χ 는 슈도우 페이딩 (shadow fading)을 나타낸다. l 번째 전력 공유기에서 k 번째 단말까지의 거리 d 는 다음 표 1과 같다.

모의실험에서 블록 페이딩 (block fading) 채널과 시변 페이딩 (time-varying fading) 채널을 고려한다. 블록 페이딩 채널에서 평균 수신 전력은 200개의 독립적인 블록 페이딩 채널에서 측정된 최소 전력을 수

표 1. l 번째 전력 공유기에서 k 번째 단말까지의 거리 (단위: m)
Table 1. Distance from l -th AP to k -th user (unit: m)

$l \setminus k$	단말 1	단말 2	단말 3	단말 4	단말 5
공유기 1	2.0	2.8	3.5	7.5	7.5
공유기 2	7.5	3.5	3.0	2.0	2.5
공유기 3	3.5	3.5	2.5	8.0	7.5

신하는 단말의 수신 전력 평균을 의미한다. 또한, 시변 페이딩 채널의 수신 전력은 최소 전력을 수신하는 단말의 순시 수신 전력을 나타낸다.

4.2 가변 스텝 크기 설정

전력 크기 피드백 주기 $T_f = 100 T_s$ 이고, 블록 페이딩 채널을 고려할 때 (6)에서 정의한 가변 스텝 크기를 적용하기 위해 파라미터 a 와 b 를 모의실험을 통해 결정한다. 그림 5에서는 $0.001 \leq a \leq 0.009$, $0.1 \leq b \leq 0.5$ 의 범위에서 a 는 0.002 간격으로 변하고, b 는 0.1 간격으로 변할 때 평균 수신 전력의 변화를 도사하였다. 그림 6에서는 $b=0.2$ 일 때 a 의 변화에 따른 평균 수신 전력 변화를 보인다. 또한, 그림 7에서는 $a=0.003$ 일 때 b 의 변화에 따른 평균 수신 전력 변화를 나타낸다. 계수 a 는 $i=0$ 일 때 스텝 크기의 초기값을 의미하며, 이 값이 작은 경우 수렴 속도가 느려서 최적값 대비 수신 전력 손실이 커지고, 이 값이 큰 경우 수렴 후 정상 상태(steady-state)에서 초과 평균자승오차가 커져서 수신 전력 손실이 증가한다.

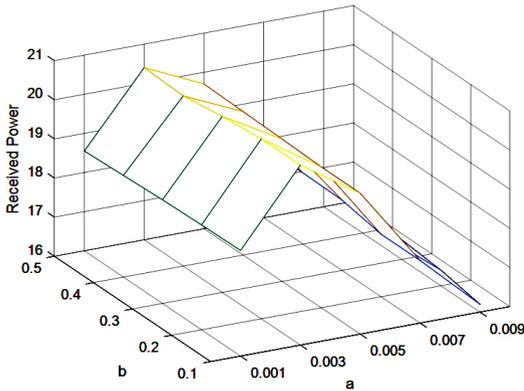


그림 5. a 와 b 의 변화에 따른 평균 수신 전력
Fig. 5. Average received power for varying a and b

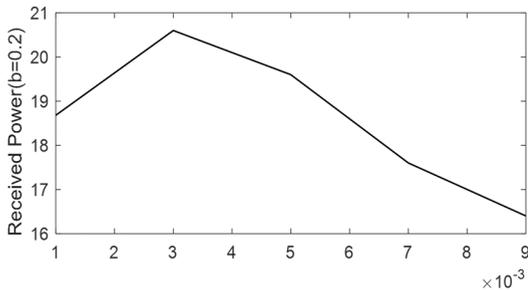


그림 6. $b=0.2$ 일 때 a 의 변화에 따른 평균 수신 전력
Fig. 6. Average received power for varying a when $b=0.2$

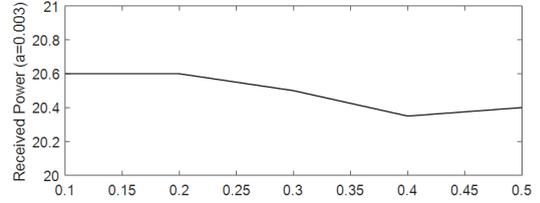


그림 7. $a=0.003$ 일 때 b 의 변화에 따른 평균 수신 전력
Fig. 7. Average received power for varying b when $a=0.003$

그림 6에서 $a=0.003$ 이 최적임을 알 수 있다. 계수 b 는 업데이트 횟수 i 가 증가함에 따라 스텝 크기가 변화하는 속도를 조절한다. b 가 지나치게 작으면 정상 상태에서 스텝 크기가 커져 초과 평균자승오차가 증가하고, b 가 지나치게 커지면 스텝 크기가 과도하게 빨리 감소해서 최적값에 수렴하지 못하는 문제가 발생한다. 그림 7에서 $b=0.2$ 가 최적임을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7을 비교하면 평균 수신 전력이 파라미터 a 에 더 민감함을 확인할 수 있다.

4.3 제안된 에너지 빔포밍 기법 수렴 특성

그림 8은 블록 페이딩 채널에서 제안된 기법을 이용하여 에너지 빔포밍 벡터를 업데이트 할 때 수렴 특성을 나타내며 이때 $\chi = 0$ 으로 가정한다. 수렴 특성을 비교를 위해 제안된 기법의 전력 크기 피드백 주기 T_f 는 $\{20, 50, 100\} T_s$ 로 변경하면서 모의실험을 수행하였다.

$n > 1500$ 일 때 제안된 기법의 수신 전력 정상 상태로 수렴함을 알 수 있고, 전력 크기 피드백 주기가 커

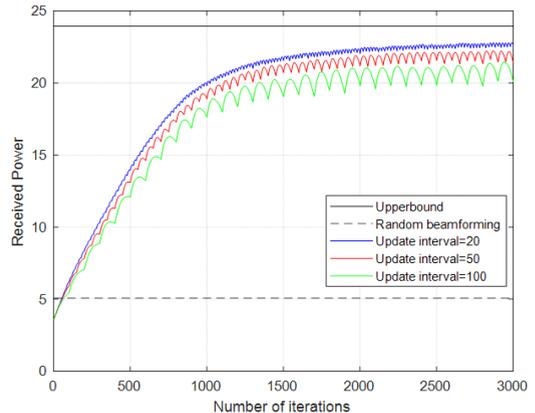


그림 8. 블록 페이딩 채널에서 제안된 빔포밍 기법의 수렴 특성
Fig. 8. Convergence characteristics of the proposed beamforming method in block fading channels

표 2. 블록 페이딩 채널에서 정상 상태 평균 수신 전력 비교
Table 2. Comparison of average steady-state received power in block fading channels

Beamforming method	Average receive power	Power loss compared to upper bound
Upper bound	-16.08 dBm	-
Proposed method ($T_f = 20 T_s$)	-16.80 dBm	0.72 dB
Proposed method ($T_f = 50 T_s$)	-17.43 dBm	1.35 dB
Proposed method ($T_f = 100 T_s$)	-17.84 dBm	1.76 dB
Random beamforming	-22.83 dBm	6.75 dB

지만 정상 상태에서 이론적 최적 피드백 기법(upper bound) 대비 수신 전력 손실이 커짐을 확인할 수 있다.

표 2는 블록 페이딩 채널에서 정상 상태로 수렴한 후 빔포밍 기법에 따른 평균 수신 전력을 비교해서 보여준다. 제안된 기법의 경우 $T_f = 20 T_s, 50 T_s, 100 T_s$ 일 때 최적 빔포밍 기법 대비 각각 0.72, 1.35, 1.76 dB의 전력 손실을 나타낸다. 또한, 제안된 기법은 피드백을 이용하지 않는 랜덤 빔포밍 기법에 비해 6.01~6.51 dB의 전력 이득을 보인다.

그림 9는 정규화된 도플러 주파수 ($f_d T_s$)가 0.0003인 시변 페이딩 채널에서 제안된 빔포밍 기법의 순시 수신 전력 변화를 나타낸다. 이때 웨도우 페

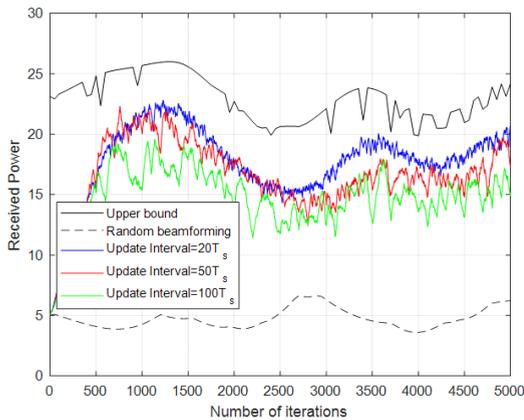


그림 9. $f_d T_s = 0.0003$ 인 시변 페이딩 채널에서 빔포밍 기법에 따른 순시 수신 전력
Fig. 9. Transient received power for various beamforming methods in time-varying channels with $f_d T_s = 0.0003$

이딩 χ 는 평균 0, 표준편차 3dB인 랜덤 변수로 가정한다. 최적 빔포밍 기법의 경우 채널의 시간적 변화를 고려해서 최적화 문제 (3)의 최적해를 반복적으로 구해서 빔포밍을 수행한다. 블록 페이딩 채널을 사용한 그림 8과 유사하게 $m > 1500$ 일 때 수신 전력이 정상 상태에 수렴하고, 전력 크기 피드백 주기 T_f 가 커지면 정상 상태에서 이론적 최적 기법 대비 수신 전력 손실이 커짐을 확인할 수 있다.

표 3은 $f_d T_s = 0.0003$ 인 시변 페이딩 채널에서 정상 상태로 수렴 후 제안된 빔포밍 기법의 평균 수신 전력을 나타낸다. 이때 평균 수신 전력은 $1500 \leq n \leq 5000$ 구간의 수신 전력을 200개의 독립된 채널에 대해 평균해서 구하였다. 제안된 기법의 경우 $T_f = 20 T_s, 50 T_s, 100 T_s$ 일 때 최적 빔포밍 기법 대비 각각 0.22, 0.44, 0.71 dB의 전력 손실을 보였다. 또한, 제안된 기법은 피드백을 이용하지 않는 랜덤 빔포밍 기법에 비해 4.99~6.03 dB 전력 이득을 얻는다.

전체적으로 T_f 가 증가함에 따라 평균 수신 전력 손실이 점진적으로 증가한다. 반면에 전력 크기 피드백에 의한 상향링크 제어 채널 부하는 T_f 에 반비례한다. 따라서 실제 시스템에서는 전력 크기 피드백 설정 시에는 정상 상태에서 수신 전력 손실과 단말의 전력 크기 피드백 부하를 동시에 고려해서 피드백 주기 T_f 를 설정해야 한다.

표 3. $f_d T_s = 0.0003$ 인 시변 페이딩 채널에서 정상 상태에서의 평균 수신 전력 비교
Table 3. Comparison of average steady-state received power in time-varying fading channels with $f_d T_s = 0.0003$

Beamforming method	Average receive power	Power loss compared to upper bound
Upper bound	-16.39 dBm	-
Proposed method ($T_f = 20 T_s$)	-17.35 dBm	0.96 dB
Proposed method ($T_f = 50 T_s$)	-17.74 dBm	1.35 dB
Proposed method ($T_f = 100 T_s$)	-18.26 dBm	1.87 dB
Random beamforming	-23.29 dBm	6.90 dB

V. 결 론

본 논문에서는 다중 사용자 다중 안테나 환경에서 1-비트 피드백과 전력 크기 피드백을 동시에 사용하는 혼합 피드백 기법과 가변 스텝 크기 기반 빔포밍 업데이트를 이용한 에너지 빔포밍 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 다중 공유기와 다수 사용자가 배치된 실제 무선 전력 전송 환경에서 랜덤 빔포밍 대비 상당한 전력 전송 성능 이득을 나타내고, 최적 빔포밍 기법에 근접한 보였다. 제안된 기법은 다수의 전력 공유기를 이용한 무선 충전 기능을 제공하는 저전력 사물인터넷 기기 혹은 저전력 센서 단말에 적용하여 상향링크 정보 전송 용량 증대 및 단말 동작 시간 연장에 활용할 수 있다.

References

- [1] X. Lu, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Comm. Surv. & Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Oct. 2014.
- [2] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1413-1452, Nov. 2015.
- [3] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, "Multi-antenna wireless powered communication with energy beamforming," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 12, pp. 4349-4361, Dec. 2014.
- [4] Z. Ding, et al., "Application of smart antenna technologies in simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 4, pp. 86-93, Apr. 2015.
- [5] V. Palazzi, M. D. Prete, and M. Fantuzzi, "Scavenging for energy: A rectenna design for wireless energy harvesting in UHF mobile telephony bands," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 18, no. 1, pp. 91-99, Jan. 2017.
- [6] Y. Zeng, B. Clerckx, and R. Zhang, "Communications and signals design for wireless power transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 5, pp. 2264-2290, May 2017.
- [7] Y. Zeng and R. Zhang, "Optimized training design for wireless energy transfer," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 2, pp. 536-550, Feb. 2015.
- [8] Y. Zeng and R. Zhan, "Optimized training for net energy maximization in multi-antenna wireless energy transfer over frequency-selective channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 6, pp. 2360-2373, Jun. 2015.
- [9] Y. Huang and B. Clerckx, "Waveform design for wireless power transfer with limited feedback," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 415-429, Jan. 2018.
- [10] B. C. Banister and J. R. Zeidler, "A simple gradient sign algorithm for transmit antenna weight adaptation with feedback," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 5, pp. 1156-1171, May 2003.
- [11] Y.-G. Hong, J. Lee, and J. Park, "Distributed beamforming based on one-bit feedback in interference channel," *J. KICS*, vol. 44, no. 8, pp. 1460-1466, Aug. 2019.
- [12] J. Xu and R. Zhang, "Energy beamforming with one-bit feedback," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 20, pp. 5370-5381, Oct. 2014.
- [13] K. W. Choi, D. I. Kim, and M. Y. Chung, "Received power-based channel estimation for energy beamforming in multiple-antenna RF energy transfer system," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 6, pp. 1461-1476, Mar. 2017.
- [14] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2004.
- [15] "Propagation data and prediction models for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz," Recommendation ITU-R P.1238, 1997.

김 선 영 (Seonyeong Kim)



2013년~2018년 : 가톨릭대학교
정보통신전자공학부 학사
2018년~2020년 : 한국항공대학
교 석사
<관심분야> 이동통신, 통신신
호처리, 모뎀 설계

[ORCID:0000-0003-0806-2102]

최 지 훈 (Jihoon Choi)



1993년~1997년 : KAIST 전기
및전자공학과 학사
1997년~2003년 : KAIST 전자
전산학과 석사 및 박사
2003년~2004년 : University of
Texas, Austin 방문연구원

2004년~2008년 : 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원
2008년~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부
교수
<관심분야> 무선 전력 전송, 물리계층 보안 통신,
이동통신, 통신신호처리, 모뎀 설계
[ORCID:0000-0002-5433-2241]